

S-D

33-0211/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

ibmb

AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN

TU BRAUNSCHWEIG

Beethovenstr. 52 33-0211/001

Zwischenbericht

zum Forschungsvorhaben:

Praxisnahes Verfahren zur Beurteilung der Dichtigkeit
oberflächennaher Betonschichten im Hinblick auf die
Dauerhaftigkeit

von

Dipl.-Phys. K. Paulmann

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Kennwort: Gefügedichtigkeit

Antrag vom 14.10.1986

Az.: Ro 288/24 - 1

Stand: 01.05.1989

1. Einleitung

Entscheidend für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton gegenüber Witterungseinflüssen ist die Dichtigkeit der oberflächennahen Schicht - Betondeckung der Bewehrung von höchstens 5 cm Dicke - gegenüber Stoffen, die den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen, also im wesentlichen Wasser, O_2 , CO_2 , SO_2 und Cl-Ionen.

Als Mechanismen für den Stofftransport im Porenraum des Betons kommen im wesentlichen

- Diffusion (Transport von Flüssigkeiten oder Gasen aufgrund eines Partialdruckgefälles),
- Permeation (Transport von Flüssigkeiten oder Gasen aufgrund eines Absolutdruckgefälles) und
- Kapillarleitung (Transport von Flüssigkeiten aufgrund ihrer Oberflächenspannung)

in Betracht.

Die unterschiedliche Abhängigkeit der zugehörigen Transportkoeffizienten - Diffusions-, Permeabilitäts- und Wasseraufnahmekoeffizient - vom Porenradius ist bekannt, z.B. /1 - 5/, und läßt bei Beton, dessen Porensystem durch eine über mehrere Zehnerpotenzen sich erstreckende Radienverteilung gekennzeichnet ist, eine einfache Umrechenbarkeit nicht erwarten; trotzdem zeigen zahlreiche Untersuchungen, z.B. /6 - 14/, einen gleichartigen Einfluß betontechnologischer Parameter wie w/z-Wert, Verdichtung und Nachbehandlung auf alle Transportkoeffizienten.

Da Diffusionsmessungen den vergleichsweise höchsten apparativen und zeitlichen Aufwand erfordern, kommt der Messung der Permeabilität - neben der Kapillarleitung - besondere Bedeutung bei der Beurteilung der Dichtigkeit oberflächennaher Betonschichten zu.

Die Bestimmung des Permeabilitätskoeffizienten von Beton im Labor, zweckmäßigerweise an scheibenförmigen Proben mit eindimensionaler, räumlich homogener Durchströmung, ist seit Jahren Stand der Technik; entsprechende Apparaturen werden auch kommerziell angeboten. Für die Untersuchung des Einflusses betontechnologischer Parameter auf die Dichtigkeit steht damit ein geeignetes Instrument zur Verfügung.

Die Beurteilung der Dichtigkeit von Beton am Bauwerk - mit dem Ziel einer Dauerhaftigkeitsprognose - setzt möglichst einfache, zerstörungsarm arbeitende Verfahren mit transportablen Apparaturen voraus. In der Literatur /15 - 18/ finden sich zahlreiche Anordnungen unterschiedlicher Geometrie; ein wesentlicher Unterschied zur Permeabilitätsmessung an scheibenförmigen Probekörpern besteht darin, daß die Stromlinien i.a. gekrümmt sind, d.h. die Stromdichte ortsabhängig ist.

Daß sich keines dieser Verfahren bisher allgemein durchsetzen konnte, ist u.E. auf jeweils unterschiedliche handhabungs- oder meßtechnische Schwierigkeiten zurückzuführen sowie darauf, daß Reproduzierbarkeit, Vertrauensbereich und damit auch Anwendungsgrenzen nicht bekannt sind oder nicht den praktischen Anforderungen genügen.

Es wurde daher der Versuch unternommen, mit einem neuen Verfahren diese erkannten Nachteile zu vermeiden und den Nachweis der möglichst uneingeschränkten Eignung für Messungen am Bau zu erbringen.

2. Physikalische Grundlagen

Nach dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz gilt für die eindimensionale, laminare Strömung eines inkompressiblen Mediums (Flüssigkeit) durch ein poröses Material

$$Q = K \cdot \frac{A}{\eta L} \cdot (p_e - p_a)$$

- mit K spezifischer Permeabilitätskoeffizient [m^2]
 Q Volumenstrom [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
 η Viskosität des strömenden Mediums [Nsm^{-2}]
 L Dicke des Probekörpers parallel zur Strömung [m]
 A Querschnittsfläche des Probekörpers [m^2]
 p_e, p_a Eingangsdruck und Ausgangsdruck des strömenden Mediums absolut
 [Nm^{-2} , Atmosphärendruck = $10^5 \text{ Nm}^{-2} = 1 \text{ bar}$]

Ist das strömende Medium kompressibel (Gas), so folgt mit Hilfe des Boyle-Mariotteschen Gesetzes $p \cdot V = \text{const.}$ und der Forderung, daß die Massenstromdichte räumlich konstant ist:

$$Q = K \cdot \frac{A}{\eta L} \cdot \frac{(p_e - p_a)(p_e + p_a)}{2 p_m},$$

dabei ist p_m der Absolutdruck, bei dem der Volumenstrom Q gemessen wird. Auflösung nach dem Permeabilitätskoeffizienten K liefert

$$K = Q \cdot \frac{\eta L}{A} \cdot \frac{2 p_m}{(p_e - p_a)(p_e + p_a)}$$

Erfolgen die Ausströmung und die Messung des Volumenstromes bei Atmosphärendruck, so vereinfacht sich obige Gleichung zu

$$K = \frac{Q \eta L}{A} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-5}}{(p_e^2 - 1)},$$

wobei p_e in bar einzusetzen ist.

Bei der Strömung zwischen nicht parallelen Grenzflächen ist L/A durch einen zunächst unbekannten Geometriefaktor zu ersetzen.

3. Meßverfahren

3.1. Ursprüngliche Planung

Für das hier zu entwickelnde Meßverfahren war ursprünglich eine Geometrie ähnlich /16/, dort Fig. 4, beabsichtigt, d.h. zwei parallele Bohrungen senkrecht zur Betonoberfläche. Durch eines der Bohrlöcher sollte ein inertes Gas unter Druck in den Beton eingeleitet werden, der aus dem anderen Bohrloch bei Atmosphärendruck austretende Gasstrom sollte gemessen werden (geringere Probleme mit der Abdichtung als bei Messung des in den Beton eintretenden Gasstromes, d.h. auf der Hochdruckseite).

Die Geometrieparameter Tiefe, Durchmesser und gegenseitiger Abstand der Bohrlöcher sowie ggf. die Tiefe eines gasdichten Verschlusses des oberen Teils der Bohrlochwandung sollten so variiert werden, daß die Gasströmung im wesentlichen innerhalb einer einige cm dicken Oberflächenschicht erfolgte, d.h. die mittlere Permeabilität der die Stahlbewehrung überdeckenden Betonschicht beurteilt werden konnte.

Vorversuche hatten die grundsätzliche Eignung dieser Geometrie bewiesen. Im Verlaufe der weiteren Untersuchungen zeigte sich jedoch, daß der Gas-mengenstrom aus verschiedenen, im gleichen Abstand um eine Lufteintrittsöffnung angeordneten Austrittsbohrungen sehr unterschiedlich war. Daher wurde die ursprüngliche Geometrie so abgewandelt, daß eine Mittelung über ein größeres Betonvolumen erfolgte.

3.2. Beschreibung des Verfahrens

Nach Vorversuchen zur Festlegung von Geometrieparametern, über die im nächsten Abschnitt berichtet wird, wird zur Messung der Permeabilität oberflächennaher Betonschichten am Bauwerk folgendes Verfahren angewendet, vergl. Anlage 1:

- Senkrecht zur Betonoberfläche wird ein ca. 35 mm tiefes Loch mit 11 mm Durchmesser gebohrt (Schlagbohrmaschine oder Bohrhammer mit hartmetallverstärktem Bohrer).

- Ein Injektionspacker mit 10 mm Durchmesser wird so in das Bohrloch eingesetzt und verspannt, daß das Bohrloch bis zu derjenigen Tiefe abgedichtet wird, die der Dicke der zu untersuchenden Betonschicht entspricht (ca. 15...30 mm, ggf. auch mehr).
- Über die Bohrung des Packers wird im nicht versperren Teil des Bohrloches ein Gasdruck von ca. 2 bar aufgebracht.
- Auf die Betonoberfläche, um das Bohrloch herum, wird ein Gefäß (Gassammler) zum Auffangen des aus der Betonoberfläche ausströmenden Gases dicht aufgesetzt (flacher Zylinder mit kreisringförmigem Querschnitt, innerer Durchmesser 30 mm, äußerer Durchmesser 100 mm, Höhe 5 mm; die unmittelbare Umgebung des Bohrloches wird also ausgespart).
- Am Ausgang des Gassammlers erfolgt die Messung des stationären Gasdurchflusses.

Im Detail wird dabei wie folgt vorgegangen:

Als strömendes Medium wird, nach anfänglichen Versuchen mit Druckluft, nachgereinigter Stickstoff aus einer 10l-Druckgasflasche verwendet. Mit einem Reduzierventil einfacher Bauart kann der Druck von 2 bar genügend genau und zeitstabil eingestellt werden. Die Druckmessung erfolgt mit einem batteriebetriebenen Digitalmanometer. Das Gas wird durch eine Trockenpatrone geleitet (was bei Verwendung von nachgereinigtem Stickstoff wahrscheinlich überflüssig ist).

Die Abdichtung des Gassammlers gegen die Betonoberfläche erfolgt mit Vaseline. Bei nur geringem Überdruck im Gassammler ($\leq 1 \text{ mbar} = 10 \text{ mm WS}$) wird so völlige Dichtigkeit auch auf rauen Oberflächen erreicht.

Zur Durchflußmessung wird ein flüssigkeitsgefülltes Schrägrohrmanometer mit Meßbereich 1 mbar verwendet (U-Rohr-Prinzip mit fast horizontaler Meßkapillare). Dabei variiert der Absolutdruck des in Sammler und Manometer eingeschlossenen Gases um maximal 1 o/oo, die Kompression des Gases ist also vernachlässigbar, in der Meßkapillare ($\varnothing 4 \text{ mm}$) findet praktisch eine reine Volumenmessung statt.

Alternativ zu der hier beschriebenen Methode der Messung des Gasvolumenstromes könnte auch z.B. ein Blasenähler verwendet werden. Wichtig ist, daß der sich im Gassammler aufbauende Gegendruck (Überdruck über Atmosphärendruck) möglichst gering ist. Andernfalls tritt, insbesondere bei relativ porösem Beton, eine Querströmung unter dem Rand des Sammlers hinweg ins Freie auf, die das Meßergebnis verfälscht. Dieser Effekt wurde experimentell schon beobachtet (vergl. Abschnitt 4.2), er macht sich durch einen nicht zeitlinearen Anstieg der Flüssigkeitssäule im Schrägröhrmanometer bemerkbar.

Nach Anlegen des Druckes am Injektionspacker stellt sich die stationäre Durchströmung erst mit einer gewissen Verzögerung ein. Eine Wartezeit von ca. 15 Minuten bis zur Messung des Durchflusses hat sich als ausreichend erwiesen.

Als Vorteile des beschriebenen Verfahrens sind zu nennen:

- einfache, zerstörungsarme (1 Bohrloch Ø 11 mm) Durchführung, das Loch kann freihändig gebohrt werden (anders z.B. bei /16/),
- das Gas strömt im wesentlichen senkrecht zur Betonoberfläche, d.h. in der Transportrichtung von Schadstoffen (anders z.B. bei /16, 17/),
- die Dicke der untersuchten Betonschicht ist innerhalb der sinnvoll erscheinenden Grenzen (\approx Überdeckung der Bewehrung) frei wählbar und bekannt (anders z.B. bei /17/),
- Undichtigkeiten der Hochdruckseite und eventuelle Risse in der Bohrlochwand beeinflussen nicht das Ergebnis, weil der austretende Gasstrom gemessen und die unmittelbare Umgebung des Bohrloches ausgespart wird (anders z.B. bei /15, 18/),
- im Gassammelgefäß baut sich ein Druck von maximal 1 mbar auf, die Abdichtung mit Vaseline ist auch auf sehr rauhen Betonoberflächen (Unebenheiten ca. 5 mm) unproblematisch (anders z.B. bei /17/),

- die Messung mittelt über ein abschätzbares, nicht zu kleines Betonvolumen, dadurch wird die Streuung der Resultate und infolgedessen die Anzahl der für eine sichere Beurteilung erforderlichen Messungen vermindert,
- es ist eine Kalibrierung des Verfahrens derart möglich, daß direkt der Permeabilitätskoeffizient - definiert für eindimensionale Strömung - des Betons angegeben wird (vergl. Abschnitt 5).

3.3. Einfluß der Geometrieparameter

Der Durchmesser der Gaseinlaßbohrung - 11 mm - wurde nicht variiert: der Durchmesser sollte möglichst klein sein, um die Beschädigung der zu untersuchenden Betonoberflächen gering zu halten, andererseits stehen Injektionspacker erst ab diesem Durchmesser zur Verfügung.

Der innere Durchmesser des Gassammlers sollte möglichst klein sein, dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Vaseline-Abdichtung die - möglicherweise durch den Bohrvorgang rissegeschädigte - Umgebung des Bohrloches hinreichend weit ausspart. Ein innerer Durchmesser von 30 mm wurde als guter Kompromiß empfunden und nicht variiert.

Als äußerer Durchmesser des Gassammlers wurden die Werte 100 mm und 150 mm erprobt, dabei ergaben sich keine signifikanten Unterschiede der aufgefundenen Gasvolumenströme (bei freien Einlaßtiefen von 15 bis 35 mm, s.u.). Es ist also davon auszugehen, daß der in die Einlaßbohrung eingeleitete Gasstrom innerhalb eines Umkreises mit $\varnothing < 100$ mm praktisch vollständig an der Oberfläche wieder austritt. Alle weiteren Versuche wurden daher mit Gassammlern mit $\varnothing = 100$ mm durchgeführt.

Die freie Einlaßtiefe, d.h. die Tiefe des vom Injektionspacker abgedichteten Teiles des Bohrloches, wurde im Bereich 15...35 mm variiert. Dabei war der an der Betonoberfläche austretende Gasvolumenstrom näherungsweise umgekehrt proportional zur freien Einlaßtiefe, d.h. der Strömungswiderstand war erwartungsgemäß der Dicke der durchströmten Schicht proportional.

Die Gesamttiefe der Einlaßbohrung wurde im Bereich von ca. 25...50 mm variiert. Bei jeweils gleicher Lage des Injektionspackers, also gleicher freier Einlaßtiefe, wurde keine signifikante Änderung des vom Sammler erfaßten Gasstromes festgestellt.

3.4. Variation des Eingangsdruckes

Bei Gültigkeit des Hagen-Poiseuilleschen Gesetzes ist für die Strömung eines kompressiblen Gases durch ein poröses Material folgende Abhängigkeit des Gasvolumenstromes Q von Eingangsdruck p_e und Ausgangsdruck p_a zu erwarten, vergl. Abschnitt 2:

$$Q \sim \frac{p_e^2 - p_a^2}{p_a}$$

Dabei sind die Drücke mit ihren Absolutwerten einzusetzen, außerdem ist vorausgesetzt, daß die Messung des Volumenstroms auf der Ausgangsseite (d.h. beim Druck p_a) erfolgt.

Bei Ausströmung gegen Atmosphärendruck wird

$$Q \sim (p_e^2 - 1) \quad (p_e \text{ in bar}).$$

Die Gültigkeit dieser Beziehung wurde bei Eingangsdrücken von 1,5...4,0 bar absolut (d.h. 0,5...3,0 bar Überdruck) überprüft, und zwar sowohl mit dem Bauwerksverfahren (d.h. bei zweidimensionaler, räumlich inhomogener Strömung) wie auch in der Permeabilitätsmeßzelle (eindimensionale, homogene Durchströmung von planparallelen Scheiben, s.u.).

Es zeigte sich, daß - wie auch von /12/ berichtet - die Meßwerte die o.g. theoretische Beziehung nicht genau erfüllen; es wurde vielmehr, und zwar übereinstimmend bei beiden Meßverfahren, ein Zusammenhang

$$Q \sim (p_e^2 - 1)^a \quad \text{mit } a \approx 0,91$$

gefunden.

Wird bei der Auswertung von Meßergebnissen näherungsweise mit $a = 1$ gerechnet, so ist der Fehler von p_e abhängig und beträgt bei $p_e = 3,0$ bar absolut (2,0 bar Überdruck) ca. 17 %. In Anbetracht der großen örtlichen Streuungen der Permeabilität von Betonoberflächen, vergl. Abschnitt 3.6, ist diese Abweichung vernachlässigbar, insbesondere wenn immer mit dem gleichen Eingangsdruck p_e bearbeitet wird (hier immer $p_e = 3,0$ bar absolut).

3.5. Meßbereich

Mit dem verwendeten Schrägrohrmanometer sind bei einem Eingangsdruck von 2,0 bar über Atmosphärendruck Gasvolumenströme im Bereich

$$0,7 \text{ mm}^3/\text{s} \lesssim Q \lesssim 100 \text{ mm}^3/\text{s}$$

meßbar (Druckanstieg um 0,1 mbar in 5 Minuten bzw. um 0,5 mbar in 10 Sekunden).

Zur Erweiterung des Meßbereichs bei hoher Permeabilität kann dem Schrägrohrmanometer ein weiteres flüssigkeitsgefülltes U-Rohr mit deutlich größerem Querschnitt parallel geschaltet werden; bei einem Durchmesser von ca. 90 mm vermindert sich die Empfindlichkeit der Volumenmessung um den Faktor 35, so daß Volumenströme bis $Q \lesssim 4 \text{ cm}^3/\text{s}$ meßbar werden.

Der Gasvolumenstrom bei gegebener Druckdifferenz liefert zunächst nur eine Maßzahl für die Permeabilität des Betons. In Abschnitt 5 wird über Versuche berichtet, die die Umrechnung dieser Maßzahl in den spezifischen

Permeabilitätskoeffizienten $K [m^2]$ zum Ziel haben. Unter der Annahme, daß die dort beschriebene Kalibrierung für eine Permeabilität sich als allgemeingültig erweist, entspricht der genannte Meßbereich für den Volumendurchfluß einer Spanne des Permeabilitätskoeffizienten von

$$7 \cdot 10^{-19} m^2 \lesssim K \lesssim 4 \cdot 10^{-15} m^2.$$

Damit wird der baupraktisch interessierende Bereich der Permeabilität von Beton abgedeckt.

3.6. Meßgenauigkeit, verfahrens- und werkstoffbedingte Streuungen

Der Fehler des reinen Meßverfahrens - Querschnittsabweichungen der Meßkapillare, Fehler bei der Kalibrierung als Volumenmeßgerät, bei der Zeitmessung zur Bestimmung des Volumenstromes und bei der Druckmessung - wird ohne Nachweis im einzelnen zu $< 10 \%$ abgeschätzt. Mehrfach wiederholte Messungen des Volumenstromes an ein und derselben Meßstelle - auch bei zwischenzeitlichem Abnehmen und Wiederaufsetzen des Gassammlers - waren mit einem Fehler $\lesssim 3 \%$ reproduzierbar.

Wesentlich größer sind die örtlichen Streuungen der Permeabilität des Betons, und zwar auch bei dicht benachbarten Meßstellen. An zwei Betonwürfeln mit 30 cm Kantenlänge wurden Messungen an mehreren Stellen der Mantelflächen durchgeführt. In einem Falle ergab sich bei 20 Meßstellen ein Variationskoeffizient der Permeabilität von 48 % bei einem offensichtlichen (nicht durch das Meßverfahren bedingten) Ausreißer; ohne diesen Wert betrug der Variationskoeffizient noch 24 %. An dem anderen Würfel wurden 15 Meßwerte ohne ersichtlichen Ausreißer mit einem Variationskoeffizienten von 53 % ermittelt. Streuungen dieser Größenordnung sind also durch den Baustoff Beton vorgegeben.

Daraufhin wurde untersucht, unter welchen Bedingungen Permeabilitätsmessungen überhaupt den Nachweis von Dichtigkeitsunterschieden gestatten. Unter der Voraussetzung, daß zwei normalverteilte Grundgesamtheiten mit Mittelwerten $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ und gleichen Variationskoeffizienten von 50 % vor-

liegen, wurde nach /19/ ermittelt, wieviel Messungen $n_1 = n_2$ erforderlich sind, um mit einer vorgegebenen statistischen Sicherheit die Grundgesamtheiten als verschieden zu erkennen.

Wie Anlage 2 zeigt, genügen z.B. bei einem Sicherheitsniveau von $\alpha = 95 \%$ und $\bar{x}_1/\bar{x}_2 \geq 3$ je 5 Messungen, während bei höherer statistischer Sicherheit und/oder geringerem Unterschied der Mittelwerte u.U. erheblich mehr Messungen erforderlich werden.

Das bedeutet, daß stichprobenartige ($n = 5 \dots 10$) Permeabilitätsmessungen zur groben Klassifizierung der Dichtigkeit - z.B. in drei Klassen: ausreichend dicht / fraglich / undicht - durchaus geeignet sind, während zum Nachweis geringerer Unterschiede erheblich mehr Messungen notwendig sind.

4. Messungen nach dem "Bauwerksverfahren"

4.1. Klimaeinfluß bei Messungen an freibewitterten Bauteilen

Um den Einfluß wechselnder Witterungsbedingungen auf die Permeabilität von Betonoberflächen festzustellen, wurden Messungen an freibewitterten Versuchswänden durchgeführt.

Dabei handelte es sich um 8 Wände der Abmessungen 2,0 m x 1,7 m x 0,12 m aus 4 verschiedenen Betonen - im wesentlichen zwischen 0,50 und 0,98 variierter w/z-Wert - bei je zwei verschiedenen Nachbehandlungsarten, die für das DFB-Forschungsvorhaben Ro 288/21-1/2 "Komplexbeanspruchung" hergestellt worden waren.

An den nach Süden orientierten unbewehrten Flächen einiger dieser Versuchswände wurden seit Juni 1988 in unregelmäßigen Abständen Permeabilitätsmessungen durchgeführt. Injektionspacker aus rostfreiem Stahl wurden einmalig so in ca. 45 mm tiefe Bohrlöcher ($\emptyset 11$ mm) eingesetzt, daß die freie Einlaßtiefe genau 25 mm betrug, und verblieben zum Schutz gegen das Eindringen von Schlagregen dauernd in den Bohrlöchern.

Die Messungen wurden jeweils bei trockenem Wetter und abgetrockneter Betonoberfläche durchgeführt; vorangegangen waren teils wochenlange Trockenheitsperioden, teils Niederschläge unterschiedlicher Dauer und Intensität.

Die aus den Meßwerten errechneten Permeabilitätskoeffizienten sind in Anlage 3 dargestellt. Das wesentliche Ergebnis dieser Untersuchung besteht darin, daß die Permeabilitäten aller Meßstellen sich zwar im Verlauf von 10 Monaten annähernd gleichartig langsam ändern, daß jedoch praktisch keine kurzfristigen Änderungen als unmittelbare Folge von Witterungseinwirkungen (Besonnung - Niederschläge) zu erkennen sind.

Daraus folgt für die Praxis, daß bei Messungen an Gebäuden auf den vorangehenden Witterungsverlauf keine Rücksicht genommen werden muß, sofern nur die Betonoberfläche etwa 1 Tag lang abtrocknen konnte.

Damit entfällt aber auch die Notwendigkeit, das Feuchteprofil an der Meßstelle zu bestimmen: offenbar erfährt durch Niederschläge der hier üblicherweise vorkommenden Dauer das Feuchteprofil des Betons wesentliche Änderungen nur in einer so dünnen Oberflächenschicht, daß nach wenigen Stunden der Austrocknung die über eine Betondicke von ca. 25 mm integrierende Permeabilitätsmessung nicht mehr nennenswert beeinflusst wird.

4.2. Messungen an älteren Gebäuden

Auf dem Gelände des ehemaligen Laboratoriums der westfälischen Zementindustrie, jetzt ZEMLABOR in Beckum wurden in den Jahren 1963 und 1964 vier "Versuchshäuser" aus Betonen mit gleichem w/z-Wert (0,60), aber mit unterschiedlichen Zementen (PZ 275, HOZ 275, HOZ 375) errichtet.

Es handelt sich um Gebäude der Grundfläche 2,0 m x 2,0 m und der Höhe 1,86 m mit Flachdach, in jeweils einer Wand ist eine 1,50 m x 0,60 m große Türöffnung.

An diesen Gebäuden wurden am 06./07.09.1988 nach dem beschriebenen Verfahren die Permeabilitäten der nach Osten, Norden und Westen orientierten Wände gemessen, siehe Anlage 4.

Auffällig an den Ergebnissen ist die deutliche und für HOZ und PZ unterschiedliche Abhängigkeit der Permeabilität von der Orientierung der Wände: während in allen Fällen die Permeabilitäten an den N-Wänden geringer als an den O-Wänden sind, steigt für W-Orientierung die Permeabilität des PZ-Betons wieder an, während diejenige der HOZ-Betone noch weiter sinkt.

Zu diesen Messungen ist anzumerken, daß auf den sehr stark verwitterten, stark absandenden Wandflächen der Häuser 1 bis 3 die Abdichtung des Gassammlers keinerlei Schwierigkeiten bereitete; vor dem Aufsetzen wurden lediglich die Meßflächen mit Hilfe einer Drahtbürste von lose anhaftenden Feinteilen gesäubert.

Bei Haus 4 war offenbar schon beim Betonieren der Wände die Brettschalung undicht, so daß Zementschlämme abfließen konnte. Derzeit zeigen die Wände im Bereich der Schalungsfugen ein waschbetonähnliches Aussehen: die Feinteile sind ausgewittert, Zuschlagskörner mit $\varnothing \geq 5 \text{ mm}$ liegen frei. Auf diesen Flächen gelang die Abdichtung des Gassammlers nur unvollkommen, weil offenbar bei ansteigendem Gasdruck im Schrägrohrmanometer in der extrem porösen Oberflächenschicht eine Querströmung unter dem Rand des Sammlers hindurch ins Freie auftreten konnte. Durch Messung bei möglichst niedrigem Gasdruck (0,1...0,2 mbar) konnten auch in diesem Falle Permeabilitätswerte gewonnen werden, die offenbar mit denen der übrigen Wände aus HOZ-Beton gut übereinstimmten, vergl. Anlage 4.

Einschließlich aller Vorbereitungs- und Aufräumarbeiten wurden von einer Person innerhalb von 12 Stunden Arbeitszeit 25 Messungen durchgeführt.

Aus anderen Untersuchungen an den gleichen Gebäuden liegen auch Meßwerte des Wasseraufnahmekoeffizienten (ISAT-Verfahren nach British Standard 1881) und der Karbonatisierungstiefe vor. Die Anzahl der Messungen ist

aber insgesamt noch zu gering, um die Korrelation dieser Größen untereinander und mit der Permeabilität zu beurteilen.

5. Apparatur zur Messung des Permeabilitätskoeffizienten

Der Permeabilitätskoeffizient eines porösen Materials ist definiert für die eindimensionale Strömung eines (inkompressiblen oder kompressiblen) Mediums, d.h. für den Fall, daß die Massenstromdichte (zumindest makroskopisch bei Mittelung über ein ausreichend großes Materialvolumen) räumlich konstant ist.

Experimentell wird diese Voraussetzung z.B. bei Messungen an planparallelen Scheiben und Durchströmung senkrecht zur Scheibenoberfläche realisiert.

Bei dem bislang beschriebenen Meßverfahren ist die Strömung zweidimensional, die Massenstromdichte des strömenden Gases ist räumlich nicht konstant, sondern in der Umgebung der Eintrittsöffnung größer als dicht unter der Betonoberfläche. Damit ist also zunächst nicht der Permeabilitätskoeffizient, sondern nur ein Permeabilitätsmaß bestimmbar.

Zum Vergleich zwischen Labor- und Bauwerksmessungen wäre eine Korrelation zwischen diesen beiden Größen wünschenswert. Theoretische Überlegungen führen zu der Vermutung, daß unter den Voraussetzungen

- immer gleicher Geometrie bei der Bauwerksmessung (Durchmesser und freie Tiefe der Eintrittsbohrung, Durchmesser des Gassammelgefäßes),
- räumlich homogener Permeabilität (z.B. keine Tiefenabhängigkeit),
- Gleichheit der Eingangs- und Ausgangsdrücke und des strömenden Mediums bei beiden Verfahren

der Umrechnungsfaktor zwischen Permeabilitätsmaß und -koeffizient allenfalls noch von der Permeabilität selbst abhängen kann. Es sollte also unter den o.g. Bedingungen möglich sein, beide Größen ineinander umzu-

rechnen - zumindest näherungsweise, wenn man berücksichtigt, daß die räumliche Homogenität der Permeabilität in der Praxis nicht kontrolliert werden kann.

Zur experimentellen Klärung dieser Fragen wurde eine Permeabilitätsmeßzelle gebaut, in der an Betonscheiben mit Durchmesser 100 mm und Dicke bis 30 mm der Permeabilitätskoeffizient gemäß obiger Definition gemessen werden kann, siehe Anlage 5.

Entsprechend dem Untersuchungsziel sind diese Scheiben als Bohrkernabschnitte aus größeren Betonkörpern an den Stellen zu entnehmen, an denen zuvor das Permeabilitätsmaß nach dem Bauwerksverfahren ermittelt worden ist. Wegen der rauhen Mantelfläche und des mittigen Bohrloches schied eine Abdichtung in der Meßzelle mit gummielastischen Materialien, wie sonst üblich, von vorneherein aus. Stattdessen werden Mantelfläche und Bohrung der Proben durch Auftragen bzw. Eingießen von flüssigem Paraffin abgedichtet, auch die mechanische Fixierung der Scheibe in der Meßzelle erfolgt mit Paraffin.

Erste Versuche ergaben, daß die Abdichtung der zentralen Bohrung unreproduzierbare Undichtigkeiten verursachte. Offenbar weist die Bohrungswand infolge der Herstellung des Loches mittels Schlagbohrer bzw. Bohrhammer Risse auf, die durch das flüssige Paraffin nur oberflächlich verschlossen werden. Daher wird das Zentrum der Scheibe mit einer wassergekühlten Diamantbohrkrone von 30 mm Ø schonend ausgebohrt, d.h. die übrig bleibende Probenfläche ist genau die Meßfläche des Gassammlers. Mit dieser Änderung war die Abdichtung der Probe in der Meßzelle sehr gut reproduzierbar, Undichtigkeiten wurden nicht mehr festgestellt.

Der Vergleich beider Meßverfahren an ein- und demselben Betonvolumen macht Bohr- und Schneidarbeiten erforderlich, die zur Schonung von Beton und Schneidwerkzeug nur mit Wasserkühlung durchgeführt werden können. Damit entsteht das Problem der Änderung der Permeabilität durch Feuchteeinfluß. Es wurde daher entschieden, allen Vergleichsmessungen am völlig ausgetrockneten Betonproben durchzuführen. Wegen der Größe der Probekörper kommt nur Trocknung bei erhöhten Temperaturen in Betracht; daß dabei

durch Rißbildung zwischen Zuschlag und Zementstein möglicherweise auch die Permeabilität vergrößert wird, wird in Kauf genommen, da der Vergleich der beiden Verfahren hierdurch nicht berührt wird.

Im einzelnen sind die Untersuchungen wie folgt geplant:

- eigens hergestellte oder aus größeren Körpern herausgeschnittene Würfel von 15 cm Kantenlänge werden bei +105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet,
- an einer oder mehreren Flächen wird nach dem o.g. Bauwerksverfahren das Permeabilitätsmaß bestimmt (freie Tiefe der Gaseintrittsbohrung immer 25 mm),
- genau diese Meßstellen werden mit Kronenbohrern Ø 100 mm und Ø 30 mm herausgeschnitten, von den Bohrkernen wird die äußeren Schicht in einer Dicke von 25 mm abgetrennt,
- die kreisringförmigen Scheiben werden wieder - bei etwas niedrigerer Temperatur, ca. 95 °C, um das Entstehen neuer Risse zu vermeiden - bis zur Gewichtskonstanz getrocknet,
- danach erfolgt die Bestimmung des Permeabilitätskoeffizienten in der hier beschriebenen Meßzelle bei gleichen Gasdrücken wie zuvor.

Auf diese Weise wurden bisher vier Proben aus einem Beton mit $w/z = 0,67$ untersucht, die im getrockneten Zustand Permeabilitätskoeffizienten von $K = 2,06/2,15/2,27/2,49 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ aufwiesen. Der Gasvolumenstrom in der Meßzelle war im Mittel um den Faktor 7,2 größer als beim Bauwerksverfahren, der Umrechnungsfaktor zwischen Volumenstrom beim Bauwerksverfahren und Permeabilitätskoeffizient,

$$K = B \cdot Q,$$

ergab sich zu $B = (10,7 \pm 1,4) \cdot 10^{-10} \frac{\text{S}}{\text{m}}.$

Entsprechende Versuche an Betonen mit höherer und niedrigerer Permeabilität sind in Vorbereitung, bisher liegen jedoch nur Meßwerte für das Per-

meabilitätsmaß vor, so daß noch nicht gesagt werden kann, ob der o.g. Umrechnungsfaktor allgemeingültig ist.

6. Transportwege

Durch einen einfachen Versuch sollte festgestellt werden, ob der Gas-transport vorwiegend im Zementstein oder im Grenzbereich Zuschlag-Zementstein erfolgt.

In der Mitte der Mantelfläche eines 15cm-Betonwürfels wurde ein Loch gebohrt, ein Injektionspacker eingesetzt und mit Druckgas (N_2) von 2 bar beaufschlagt. Die Austrittsstellen des Gases auf der Betonoberfläche wurden mittels Lecksuchspray (vermutlich im wesentlichen Seifenlösung) kenntlich gemacht, farbig angezeichnet und fotografiert.

Danach wurde die Betonoberfläche in Schritten von ca. 5 mm bis zu einer Gesamttiefe von ca. 25 mm abgeschliffen; nach jedem Schritt wurden wieder die Gasaustrittsstellen markiert und fotografiert.

An den vergrößerten Negativen wurde ausgezählt, wieviele Gasaustrittsstellen, bezogen auf die jeweilige Oberfläche und den 5 mm tiefer liegenden Schnitt, in unmittelbarer Nähe (< 2 mm entfernt) eines größeren Zuschlagkorns lagen. Es ergaben sich Anteile von 56 % bis 89 %, im Mittel 71 %, der Gesamtzahl der Gasaustrittsstellen.

Wenn auch bei diesem einfachen Versuch nur die Anzahl der Gasaustrittsstellen, nicht aber die - nach Augenschein z.T. sehr unterschiedlichen - Austrittsmengen bewertet wurden, kann doch geschlossen werden, daß der Gastransport im Beton zu einem wesentlichen Teil in der Grenzzone zwischen Zuschlag und Zementstein erfolgt.

7. Zusammenfassung

Ein neues Verfahren zur Messung der Permeabilität oberflächennaher Betonschichten am Bauwerk wurde entwickelt und im praktischen Einsatz erprobt.

Das Meßverfahren ist einfach und sicher in der Anwendung, einige Nachteile ähnlicher, bisher beschriebener Anordnungen werden vermieden. Es ist zu erwarten, daß eine Kalibrierung derart möglich ist, daß nicht nur ein willkürliches Permeabilitätsmaß, sondern der spezifische Permeabilitätskoeffizient des Betons bestimmt werden kann.

Versuche an freibewitterten Wänden haben gezeigt, daß die integrale Permeabilität einer ca. 25 mm dicken Oberflächenschicht zwar langsam mit der Jahreszeit variiert, vom kurzfristigen Witterungsverlauf jedoch nicht nennenswert beeinflusst wird - ggf. bei Einhaltung einer Abtrocknungszeit von max. 1 Tag. Damit entfällt die Notwendigkeit begleitender Messungen von Feuchtegehalt und -verteilung im Beton.

8. Weiterführung der Untersuchungen

Die begonnenen Versuche zur Kalibrierung des Bauwerksverfahrens sollen an zwei weiteren Betonen unterschiedlicher Permeabilität fortgeführt werden.

An freibewitterten Wänden bzw. daraus entnommenen Proben sollen die Korrelation der Permeabilität mit der oberflächlichen Wasseraufnahme (ISAT-Verfahren nach British Standard 1881), der Porenradienverteilung (Quecksilber-Porosimetrie) und, wenn möglich, dem Diffusionswiderstand sowie die bei den jeweiligen Meßverfahren auftretenden Streuungen untersucht werden.

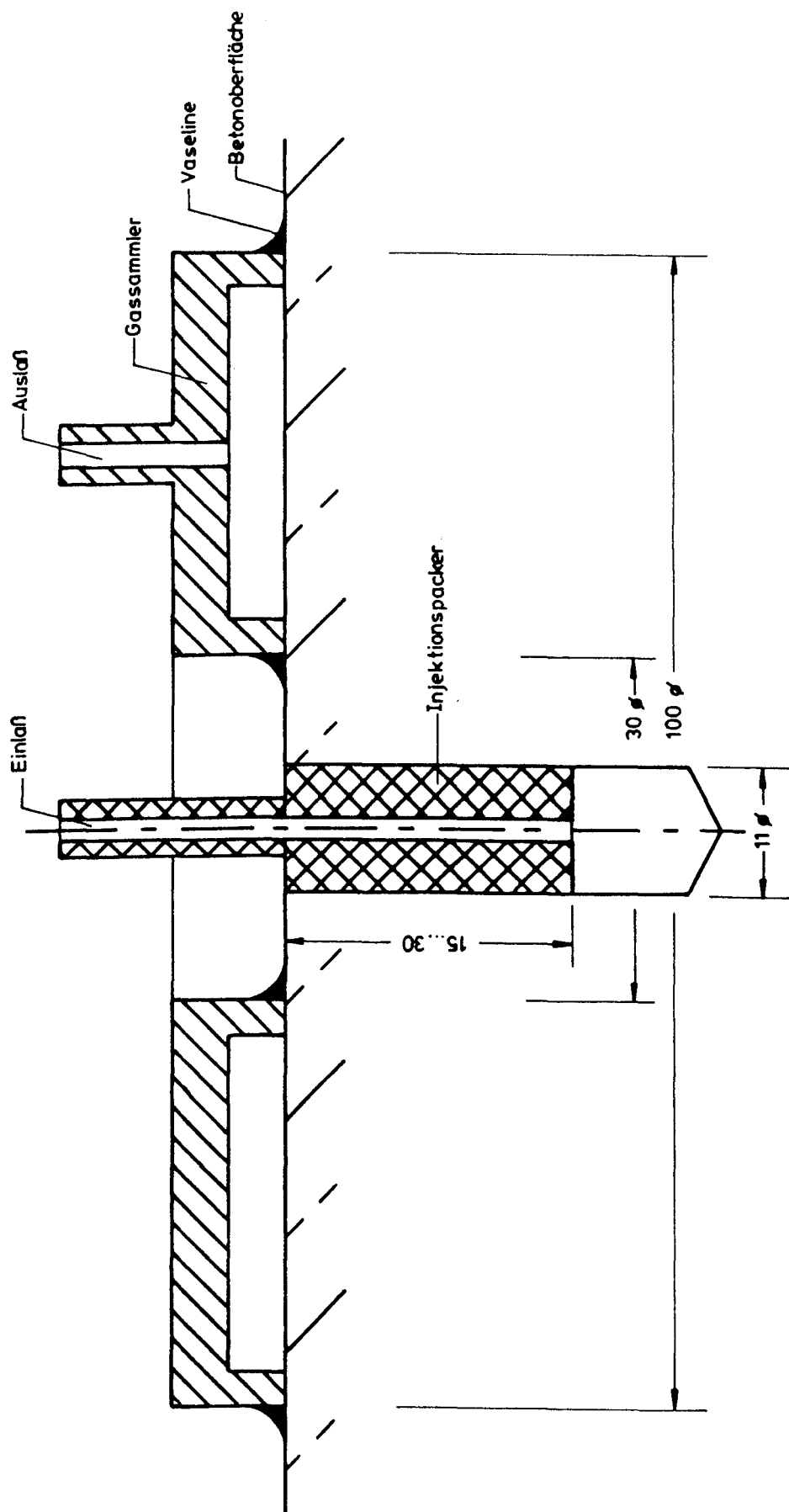
Durch Messungen an älteren Gebäuden mit und ohne Korrosionsschäden soll der im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit zulässige Größtwert der Permeabilität eingegrenzt werden.

Ferner soll geprüft werden, ob das beschriebene Verfahren auch zur frühzeitigen Erkennung von Korrosionstreibrissen über der Bewehrung eingesetzt werden kann.

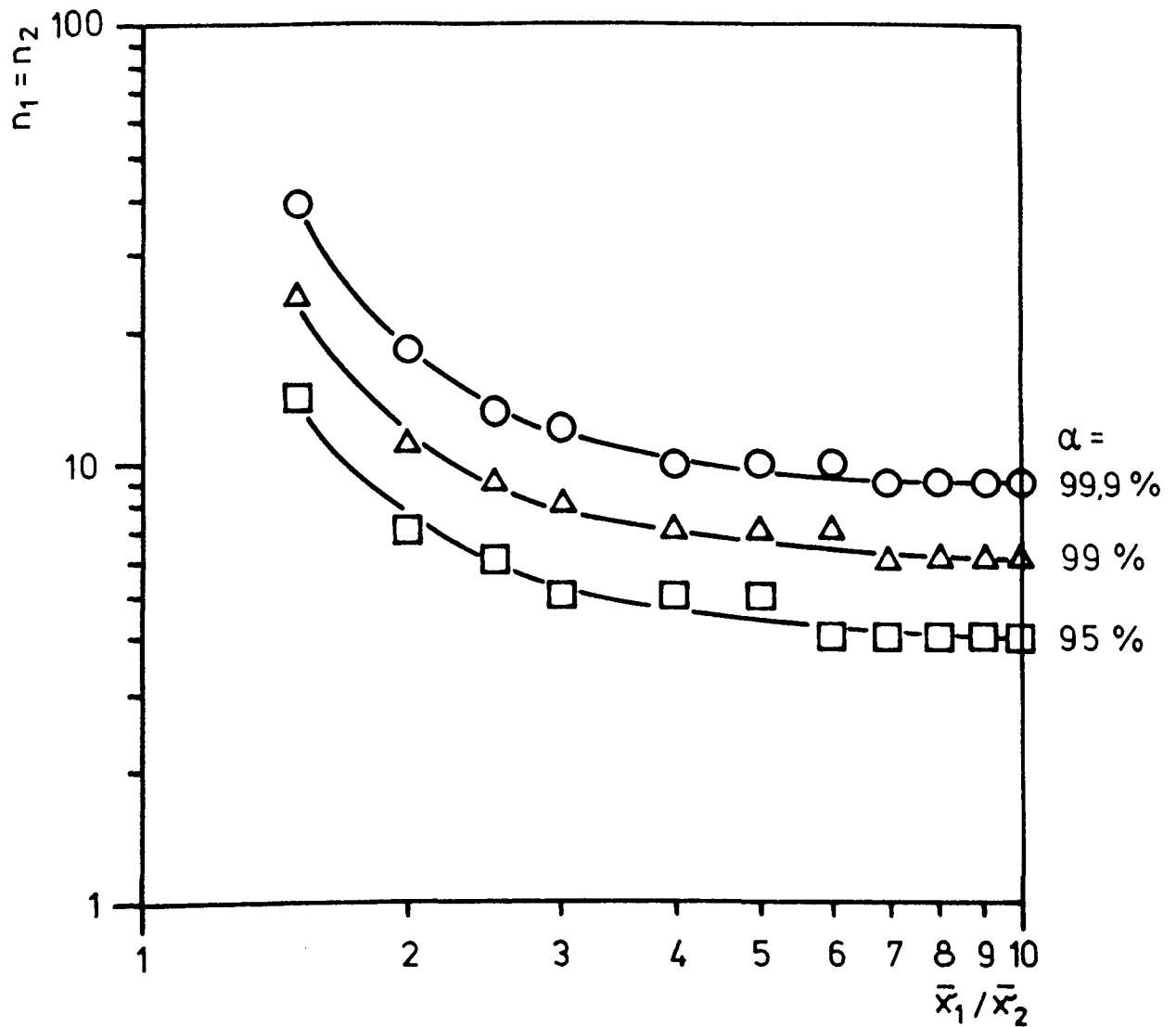
Literatur

- / 1/ Cammerer, W.F.:
Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern
VDI-Forschungsheft 500 (1963)
- / 2/ Gertis, K.; Werner, H.:
Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen
In: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen
Schriftenreihe des DAfStb, Heft 258 (1976), S. 5 - 35
- / 3/ Wolfseher, U.; Gertis, K.:
Isothermer Gastransport in porösen Stoffen aus gaskinetischer Sicht
In: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen
Schriftenreihe des DAfStb, Heft 258 (1976), S. 37 - 62
- / 4/ Stamm, K.H.D.:
Modell zur quantitativen Erfassung der physikalischen Vorgänge bei
der kapillaren Feuchtigkeitsbewegung in Bauteilen
Dissertation TH Aachen (1979)
- / 5/ Lawrence, C.D.:
Durability of concrete: molecular transport processes and test
methods
Cement and Concrete Association, Technical Report 544 (1981)
- / 6/ Powers, T.C.; Copeland, L.E.; Hayes, J.C.; Mann, H.M.:
Permeability of Portland Cement Paste
Proceedings ACI 51 (1954), S. 285 - 298
- / 7/ Chou Chen, L.; Katz, D.L.:
Diffusion of Methane Through Concrete
ACI Journal 75 (1978), No. 12, S. 673 - 679
- / 8/ Nyame, B.K.; Illston, J.M.:
Relationship between permeability and pore structure of hardened
cement paste
Magazine of Concrete Research, Vo. 33, No. 116 (1981), S. 139 - 146
- / 9/ Hurling, H.; Wierig, H.J.:
Untersuchungen zur Sauerstoffdiffusion durch die Betondeckung der
Bewehrung von Stahlbetonbauteilen
Forschungsbericht des Instituts für Baustoffkunde und Material-
prüfung der Universität Hannover (1983)
- /10/ Lawrence, C.D.:
Transport of Oxygen Through Concrete
The British Ceramic Society Meeting "Chemistry and Chemically -
Related Properties of Cement", London (1984)

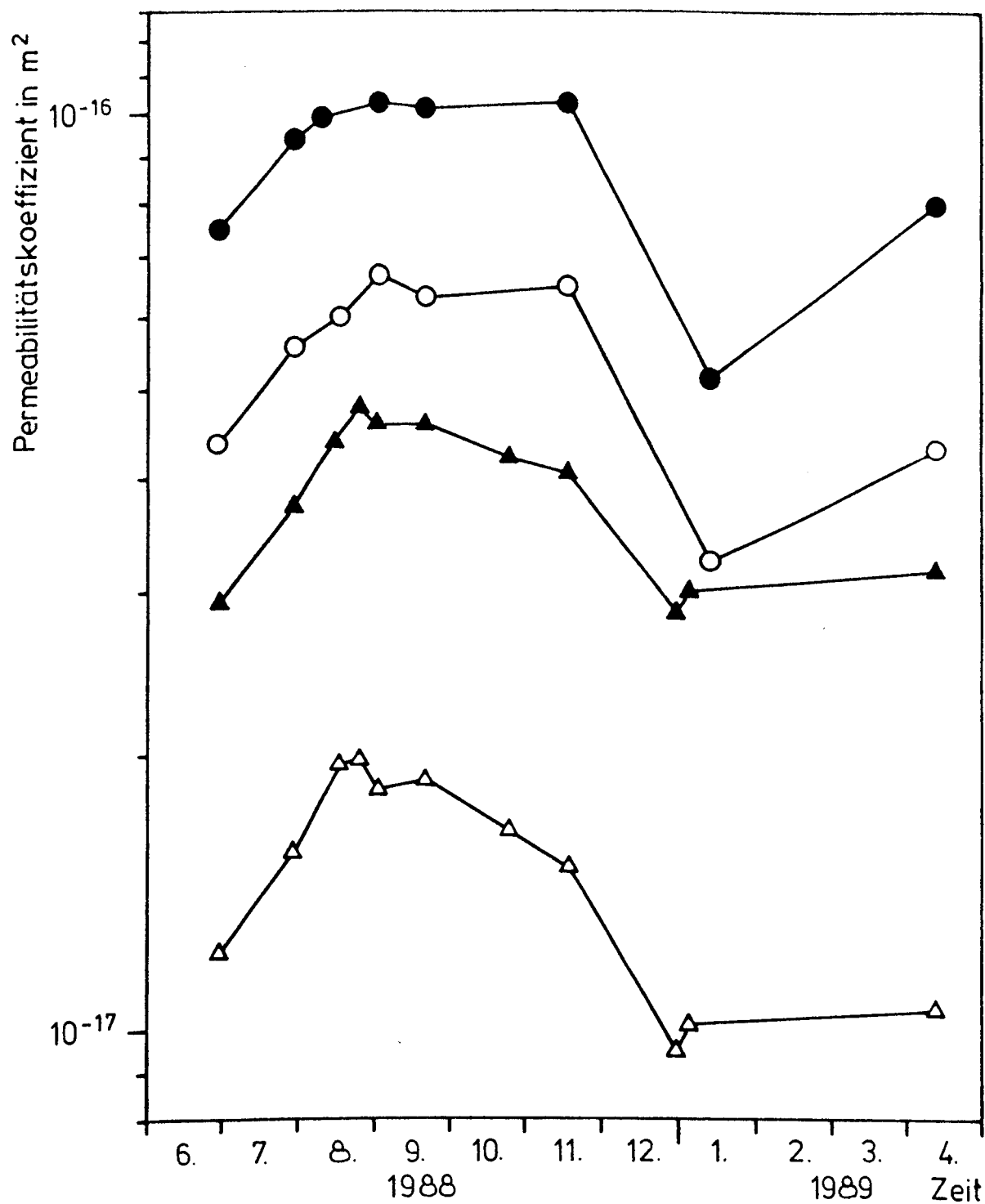
- /11/ Grube, H.; Lawrence, C.D.:
Permeability of Concrete to Oxygen
RILEM Seminar "Durability of Concrete Structures under Normal
Outdoor Exposure", Hannover (1984)
- /12/ Gräf, H.; Grube, H.:
Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton
gegenüber Gasen und Wasser
beton 36 (1986), H. 5, S. 184 - 187; H. 6, S. 222 - 226
- /13/ Gräf, H.; Grube, H.:
Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf
seine Gasdurchlässigkeit
beton 36 (1986), H. 11, S. 426 - 429; H. 12, S. 473 - 476
- /14/ Gaber, K.:
Influence of Mix Proportions and Components on the Diffusion
Coefficient and the Permeability of Concrete
Darmstadt Concrete Vol. 3 (1988), S. 39 - 48
- /15/ Figg, J.W.:
Methods of Measuring the Air and Water Permeability of Concrete
Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 85 (1973), S. 213 - 219
- /16/ Hansen, A.J.; Ottosen, N.S.; Petersen, C.G.:
Gas-Permeability of Concrete In Situ: Theory and Practice
In: Malhotra, V.M. (Ed.): In Situ/Nondestructive Testing of
Concrete
ACI Publication SP-82 (1984), S. 543 - 556
- /17/ Schönlin, K.; Hilsdorf, H.:
Evaluation of the Effectiveness of Curing of Concrete Structures
In: Concrete Durability, Katharine and Bryant
Mather International Conference, Atlanta (1987), S. 207 - 226
- /18/ Reinhardt, W.H.; Mijnsbergen, J.; Croes, J.H.:
Naar een praktische meetmethode voor de kwaliteit van de
betondekking
Cement 40 (1988) nr. 1, S. 22 - 26
- /19/ Sachs, L.:
Statistische Methoden
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1972)



Anlage 1: Anordnung zur Messung der Permeabilität oberflächennaher Betonschichten am Bauwerk



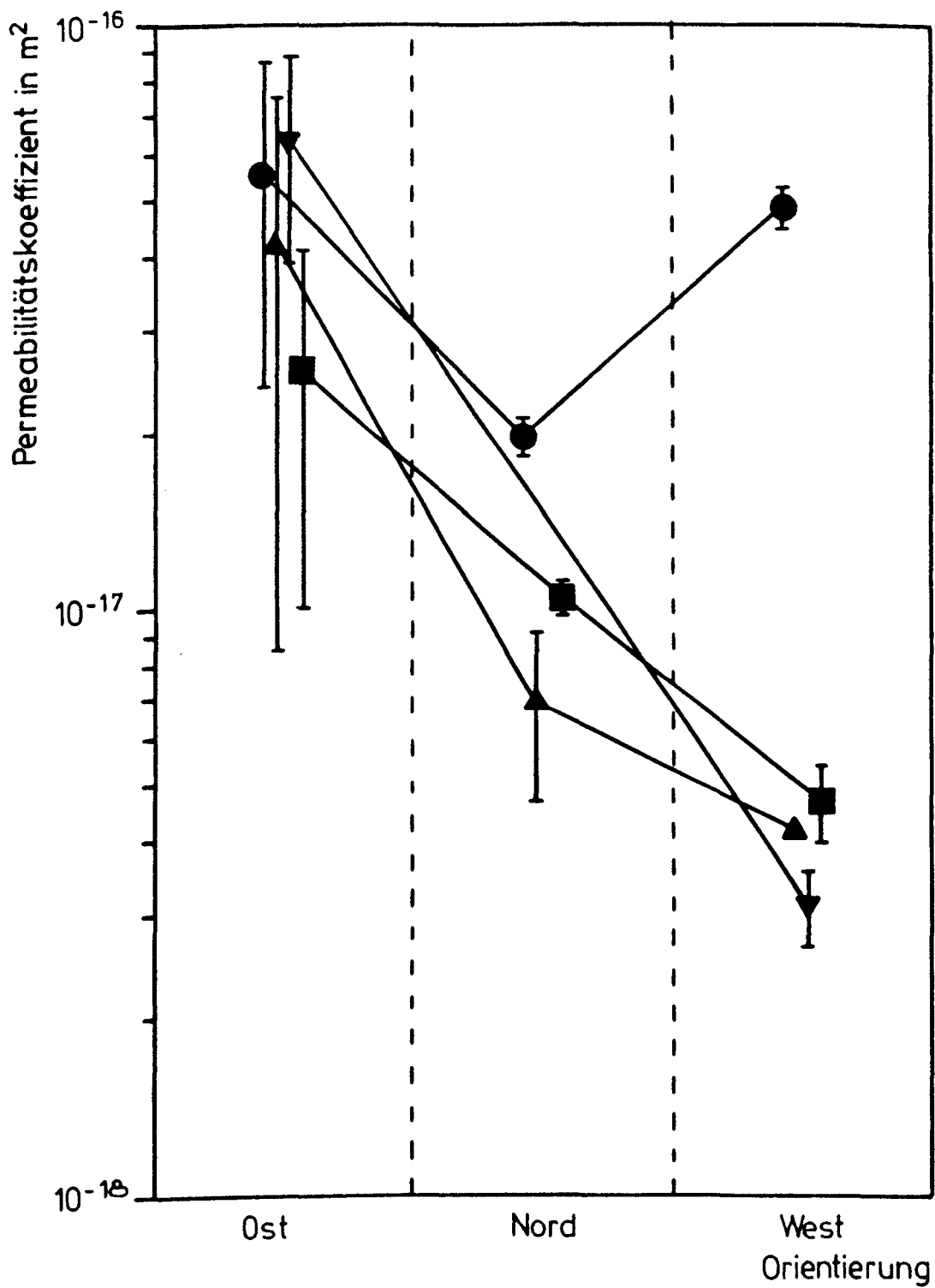
Anlage 2: Anzahl der Messungen $n_1 = n_2$, die notwendig sind, um zwei normalverteilte Grundgesamtheiten mit ungleichen Mittelwerten $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ und gleichen Variationskoeffizienten von 50 % mit einer statistischen Sicherheit von α als ungleich zu erkennen.



Anlage 3: Zeitabhängige Änderung der Permeabilität frei bewitterter Versuchswände

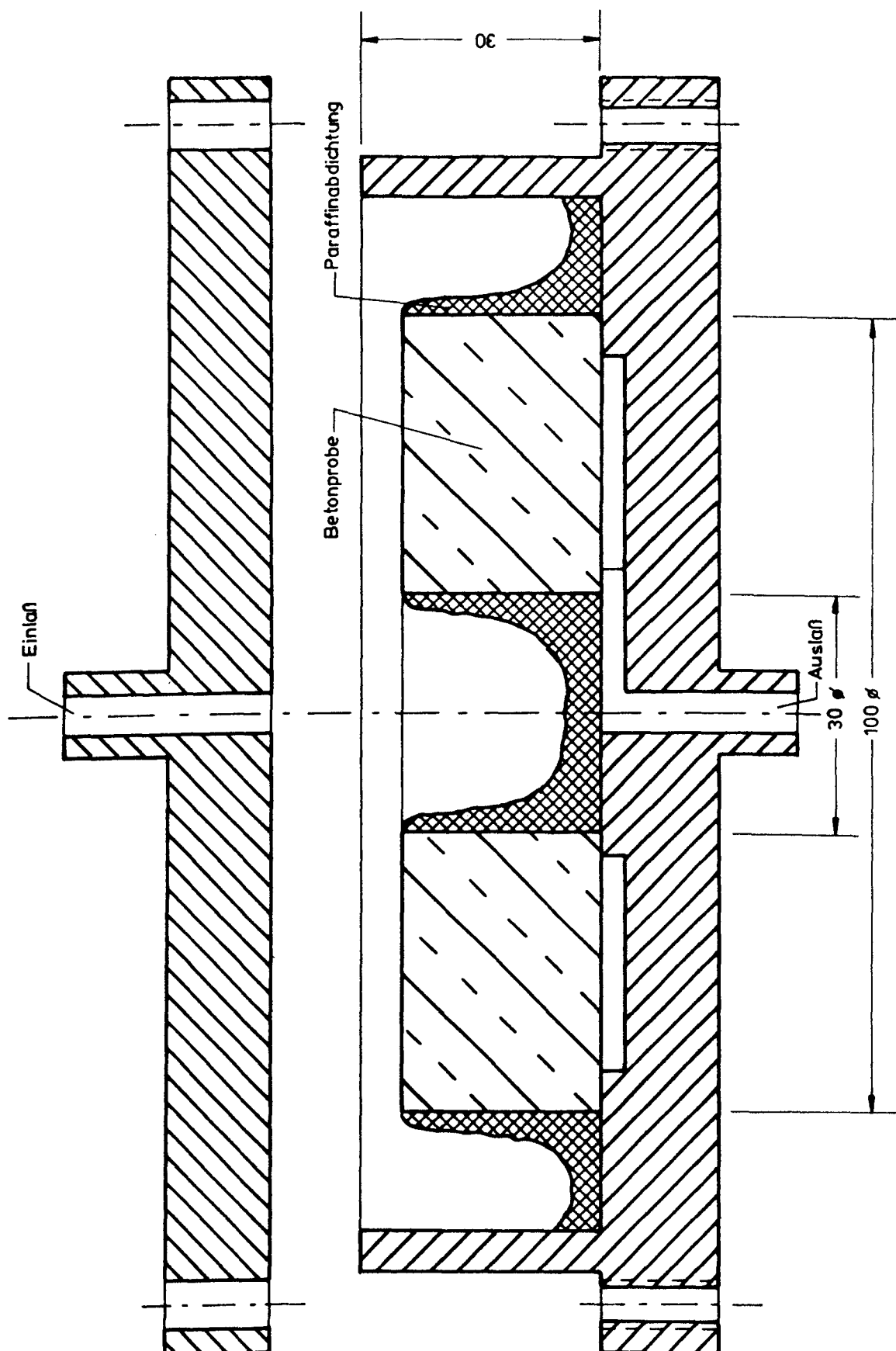
△ ▲ w/z = 0,67

○ ● w/z = 0,98



Anlage 4: Permeabilität 25 Jahre alter, frei bewitterter Betonwände in Abhängigkeit von der Orientierung

● PZ 275
 ▲ ■ H0Z 275
 ▼ H0Z 375



Anlage 5: Meßzelle zur direkten Bestimmung des Permeabilitätskoeffizienten an Bohrkernabschnitten

